

# РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИФРОВОГО ТРАНСИВЕРА КОРОТКОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА

Долматов А.Г., Лучинин А.С., Трухин М.П.  
Институт радиоэлектроники и информационных технологий  
Уральский федеральный университет им. Б.Н.Ельцина  
Ул. Мира, 32, г. Екатеринбург, 620002, Россия  
тел.: 8-912-670-5141, e-mail: r303las@mail.ru

**Аннотация** – Представлены результаты разработки и исследования трансивера по технологии SDR (программно определяемое радио) с прямым аналого-цифровым преобразованием в приемнике и цифровым формированием сигналов в передатчике. Алгоритмы формирования сигналов и обработки их на приемной стороне реализованы в ПЛИС типа XC7k325T (Xilinx). Экспериментальное исследование трансивера показало высокое качество характеристик по чувствительности, избирательности по всем видам помех и побочным излучениям. Обнаружен ряд особенностей в шумовых характеристиках основных элементов трансивера: аналого-цифрового преобразователя (LTC 2208) и цифрового формирователя сигналов (AD9957).

## DEVELOPMENT AND RESEARCH CHARACTERISTICS OF DIGITAL SHORTWAVE TRANSCEIVER

Dolmatov A. G., Luchinin A.S., Trukhin M.P.  
Institute of Radioelectronics and Informational Technologies  
Ural Federal University  
32, Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russia  
ph: 8-670-5141, e-mail: r303las@mail.ru

**Abstract** — The results of research and development on the SDR (software defined radio) transceiver using direct analogue-digital conversion in the receiver and digital signal conditioning at the transmitter. Algorithms for signal generation and processing them at the receiving end are implemented in FPGA type XC7k325T (Xilinx). Experimental research has shown high quality transceiver sensitivity characteristics of selectivity for all types of noise and spurious. It found a number of features in the noise performance of the main elements of the transceiver: an analog-digital converter (LTC 2208) and a digital signal generator (AD9957).

### I. Введение

Радиосвязь в коротковолновом диапазоне остается актуальной, несмотря на развитие современных средств мобильной и спутниковой связи [1]. Хорошего качества аппаратуры связи удастся достичь при применении современных цифровых технологий формирования и обработки сигналов.

В данном сообщении приводятся результаты разработки цифрового трансивера на основе аналого-цифрового преобразователя LTC2208 и цифрового формирователя высокочастотных сигналов (DUC) AD9957. Алгоритмы формирования сигналов и обработки их на приемной стороне реализованы в ПЛИС XC7k325T (Xilinx).

Полученные результаты оказались интересными, не полностью соответствующими ожидаемым, основанным на описаниях, приведенных в Data Sheet.

### II. Основная часть.

#### Технические характеристики трансивера.

Цифровой трансивер разработан по заказу Екатеринбургского Завода радиоаппаратуры и с его участием. Требования технического задания составлены на основании ГОСТ Р 51903-2002 (Передатчики радиосвязи стационарные декаметрового диапазона волн) и ГОСТ Р 52016-2003 (Приемники магистральной радиосвязи гектометрового-декаметрового диапазона волн). Стояла задача обеспечить основные характеристики на уровне требований ГОСТ и лучше. А за счет цифровой технологии реализации обеспечить снижение себестоимости аппаратуры.

Трансивер должен работать в диапазоне частот 0,1 – 30 МГц. При приеме необходимо выполнить основную фильтрацию – избирательность по соседнему каналу и по интермодуляционным помехам более 100 дБ; регулируемое усиление – глубина более 90 дБ; демодуляцию и формирование выходных низкочастотных сигналов. Прием и передача должны осуществляться для десяти классов излучения: A1A, A3E, R3E, H3E, J3E, J7D USB, J7D LSB+USB, F1B, G1B, X9D [2].

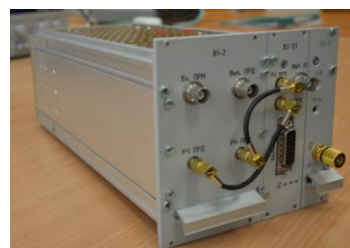


Рис. 1. Внешний вид цифрового трансивера с дистанционным управлением

Fig. 1. Appearance digital transceiver with remote control

Приемник должен обладать большим динамическим диапазоном: выдерживать блокирующую помеху до 110 дБмкВ при отстройке от центральной частоты 50 кГц; с использованием внешних аттенуаторов обеспечивать работоспособность при напряжении помехи на входе приемника до 100 В.

Предъявленные требования выполнены. Разработаны и запущены в опытное серийное производство два варианта конструкций трансивера. Внешний вид одного из них показан на рис. 1.

## Шумовые характеристики АЦП LTC2208. Аналого-цифровое преобразование слабых сигналов

АЦП (16 разрядов) имеет динамический диапазон, обусловленный собственными шумами (Noise Floor) – 78 дБ/FS (при FS=2,25 В). Динамический диапазон, обусловленный шумами квантования равен 107 дБ/FS.

Элементарный интервал квантования АЦП составляет 34 мкВ. Но в смеси с шумовым сигналом, имеющим уровень в несколько раз превышающий элементарный интервал, возможно аналого-цифровое преобразование слабых сигналов с уровнем существенно меньшим 34 мкВ [3,4]. Эта возможность используется при построении радиоприемных устройств SDR с прямым аналого-цифровым преобразованием. Минимальный уровень сигнала, который может быть преобразован, определяется соотношением спектральных плотностей сигнала и собственного шума АЦП. На рис. 2 показана спектральная диаграмма преобразования гармонического сигнала с действующим значением 2 мкВ.

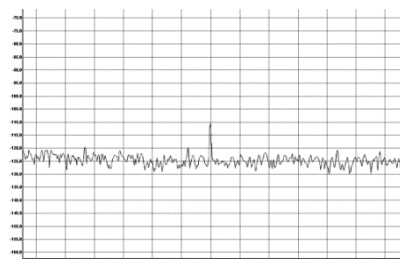


Рис. 2. Результат преобразования гармонического сигнала:  $f = 29$  МГц;  $U = 2$  мкВ. Превышение уровня сигнала над шумами 15 дБ (в полосе 991 Гц)

Fig. 2. The result of the conversion of the harmonic signal:  $f = 29$  MHz;  $U = 2$   $\mu$ V. The excess of signal over noise 15 dB (in the band 991 Hz)

Коэффициент шума [5] АЦП при сопротивлении источника сигнала  $R_r = 50$  Ом составляет 28 дБ.

Среднеквадратичное значение собственных шумов АЦП 283 мкВ – 17 элементарных интервалов квантования. Анализ (моделирование) процесса преобразования слабого сигнала совместно с широкополосным шумом показывает, что его уровень можно уменьшить до 4 – 5 элементарных интервалов квантования. Коэффициент шума снизится до 15 дБ.

### Побочные излучения передатчика. Шумовые характеристики DUCAD9957

Передающая часть трансивера построена на основе DUC AD9957. Микросхема обладает не только большими возможностями по формированию сложных сигналов, но также имеет низкий уровень фазовых шумов. В соответствии с Data Sheet уровень фазовых шумов достигает -167 дБ/Гц при частоте выходного гармонического колебания 20 МГц.

Эксперименты, проведенные в данной работе, подтвердили это значение, рис. 3.

Измерения спектра побочных излучений передатчика показали, что их уровень существенно выше значения, обусловленного фазовыми шумами,

и превышает заданный в техническом задании. Потребовалось провести измерения амплитудного шума цифрового формирователя сигналов.

Результат измерения уровня амплитудных шумов оказался неожиданным. Спектральная плотность амплитудных шумов превышает на 20 дБ спектральную плотность фазовых шумов.

Исследования шумовых характеристик других генераторов показали, что данное соотношение оказывается характерным для цифровых формирователей гармонических колебаний.

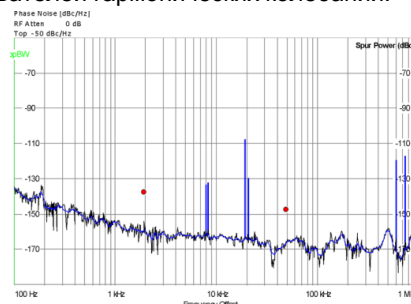


Рис. 3. Спектры фазовых и амплитудных шумов DUC AD9957. Частота 29 МГц. (точками обозначены спектральные плотности амплитудных шумов)

Fig. 3. Spectra phase and amplitude noise AD9957 DUC. Frequency 29 MHz. (the dots are the spectral density of amplitude noise)

### III. Заключение

1. Разработаны алгоритмы формирования сигналов (10 видов модуляции) для построения цифрового передатчика коротковолнового диапазона. Разработаны алгоритмы обработки сигналов в цифровом приемном устройстве обеспечивающие высокую избирательность по всем видам помех.

2. Разработан алгоритм аналого-цифрового преобразования слабых сигналов, с уровнем в 30 раз меньшим элементарного интервала квантования. Алгоритм реализован с применением АЦП LTC2208.

3. Проведены исследования шумовых свойств приемного устройства на основе АЦП LTC 2208 и формирователя сигналов на основе микросхемы AD9957. Эксперименты обнаружили ряд недостатков в шумовых характеристиках АЦП и цифровых формирователей сигналов, которые создают излишне высокие уровни шумов устройств.

### IV. Литература

- [1] Radio engineering, electronics and communication: proceedings of the III International Scientific and Technical Conference (Omsk, 6-8 October 2015) .- Omsk. Publishing house "Science", 2015. -456 p.
- [2] GOST R 51903-2002. Transmitters fixed radio decimeter wave range.
- [3] ADC Input noise: the good, the bad, and dangerous. Well, when it is not? Walt Kester (Walt Kester)/ translated from English by E. Tereshkovoy. Components and technologies, 2008, № 9, pp. 42-46.
- [4] Goldenberg L. M. and others Digital signal processing: a Handbook/ L. M. Goldenberg, B. D. Matyushkin, M. N. Pole.— M.: Radio and communication, 1985. — 312 p.
- [5] Belousov A. P. the Calculation of the noise figure of radio receivers. M.: Oborongiz, 1959.— 135 C.